



HAL
open science

Analyses préliminaires d'une chondrite ordinaire NWA XXX de type L

Lorine Saint George, Michel Dobrijevic, Aurélie Le Postollec, Laurent Londeix,
Isabelle Billy, Alain Queffelec, Yannick Anguy, Cécile Gaborieau, A. Duphil

► **To cite this version:**

Lorine Saint George, Michel Dobrijevic, Aurélie Le Postollec, Laurent Londeix, Isabelle Billy, et al..
Analyses préliminaires d'une chondrite ordinaire NWA XXX de type L. 2019. hal-04383215

HAL Id: hal-04383215

<https://hal.science/hal-04383215>

Preprint submitted on 9 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyses préliminaires d'une chondrite ordinaire NWA XXX de type L

L. Saint George¹, M. Dobrijevic², A. Le Postollec², L. Londeix³, I. Billy³, A. Queffelec⁴, Y. Anguy⁵, C. Gaborieau⁵, and A. Duphil⁵

¹Université de Bordeaux, F-33400 Talence, France

²Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux, Univ. Bordeaux, CNRS, B18N, allée Geoffroy Saint-Hilaire, 33615 Pessac, France. Email : michel.dobrijevic@u-bordeaux.fr

³Université de Bordeaux, UMR "EPOC" CNRS 5805, allée Geoffroy Saint-Hilaire, 33615 Pessac, France

⁴Université de Bordeaux, UMR "PACEA" CNRS 5199, allée Geoffroy Saint-Hilaire, 33615 Pessac, France

⁵ENSAM

Juin 2019

Résumé

Dans le cadre d'un stage de Master 1 de physique, nous avons utilisé plusieurs techniques pour analyser une chondrite ordinaire non référencée mais identifiée par un collectionneur comme une probable chondrite ordinaire de type LL. Les différentes analyses effectuées (mesure de densité, de susceptibilité magnétique, analyses élémentaires en XRF et EDS, analyse Raman) nous indiquent que ce serait plutôt une chondrite ordinaire de type L. Des analyses plus poussées permettraient de mieux caractériser cette météorite.

1 Introduction

Dans le cadre du stage de Master 1 effectué par Lorine Saint George (étudiante en Master de Physique Fondamentale et Applications de l'Université de Bordeaux), nous avons analysé quatre météorites appartenant à un ami (voir les remerciements). L'objectif général du stage était d'utiliser plusieurs techniques d'analyse pour apprendre à caractériser des météorites (voir le rapport du stage Saint George [2019a]). L'une de ces météorites était une chondrite NWA non référencée ; très probablement une chondrite ordinaire. Dans le paragraphe 2, nous présentons la météorite. Le matériel et les techniques d'analyse utilisées sont résumés dans le paragraphe 3. Les résultats des analyses sont présentés dans le paragraphe 4. Nous concluons l'ensemble des résultats de cette étude dans le paragraphe 5.

2 Présentation de la météorite

2.1 Origine

L'échantillon que nous avons analysé est une coupe d'une météorite dont la masse principale unique était de 1096 grammes. Elle a été trouvée au Maroc en 2017. Elle a été achetée en tant que chondrite ordinaire de type LL.

La masse de l'échantillon que nous avons analysé est de 172.32 ± 0.05 g et il mesure environ 50 mm selon sa plus grande longueur (voir la Figure 1).



FIGURE 1 – Photographies des différentes faces de notre échantillon de la chondrite ordinaire NWA XXX. On distingue facilement les nombreuses inclusions métalliques, les clastes blancs ainsi que les nombreux chondres gris. L'extérieur de la météorite est patiné.

2.2 Analyse morphologique succincte

Les différentes faces de la météorite sont présentées sur la Figure 1. Sur les faces principales on distingue de nombreuses inclusions métalliques. On y voit aussi de très nombreux chondres dont le diamètre dépasse 1 mm pour nombre d'entre eux. La matrice est très difficile à distinguer entre les chondres. Il y a aussi plusieurs clastes plus ou moins clairs ressemblant à des brèches.

La croûte de fusion semble avoir été remplacée par une couche patinée (probablement provoquée par le sable du désert) qui indiquerait que la météorite est restée relativement longtemps au sol avant d'être trouvée.

3 Matériel et méthode

Les différentes techniques d'analyse que nous avons utilisées pour caractériser cette météorite sont listées ci-après.

- Double pesée réalisée en salle de TP de Physique de l'Université de Bordeaux. Nous avons principalement utilisé une balance de précision limitée à 200 g (valeur maximale), avec une

- précision à l’affichage de 0.01 g. Pour l’une des météorites, nous avons changé de balance. La précision à l’affichage était alors de 1 g (voir Saint George et al. [2019b]).
- Susceptibilité magnétique réalisée au laboratoire EPOC avec l’instrument de mesure MS2E (*Surface Scanning Sensor de Bartington Instruments*[®]). La mesure a été effectuée à 0.46 kHz. La zone active de la surface du capteur représente un rectangle de 10.5 mm × 3.8 mm. La mesure est donc une moyenne de la zone correspondante.
 - Spectroscopie XRF (X-Ray Fluorescence) réalisée au laboratoire EPOC. Nous avons utilisé une énergie de 10 keV pour la source primaire de rayons X et un courant de 400 μ A. Les acquisitions duraient 10 s. L’appareil est un *Core Scanner*[®] de la société Avaatech.
 - Microanalyse X à l’aide d’un spectromètre à rayons X à dispersion d’énergie (EDS / Energy Dispersive Spectrometer). Cet instrument (*Edax Apollo XL*[®]) est intégré à un microscope électronique à balayage environnemental à effet de champ (*FEI Quanta 250 FEG*[®]). L’analyse a été réalisée sur la plateforme MACAM de l’I2M. Les expériences ont été faites avec une énergie de 20 keV pour détecter les métaux comme le fer (Fe) et le nickel (Ni). Les acquisitions duraient 100 s.
 - Spectroscopie Raman réalisée au laboratoire PACEA. L’instrument de l’équipe PACEA est un *Senterra*[®] de la société Bruker. Pour chaque spectre, nous avons utilisé le laser vert à 532 nm et fait des séries de 5 ou 10 co-additions de 10 s. Les spectres obtenus sont comparés à la base de données RRUFF Lafuente et al. [2015] ou à la littérature spécifique pour le carbone Tuinstra and Koenig [1970].

4 Resultats

4.1 Densité

La mesure de densité effectuée par double pesée est de 3.47 ± 0.09 . Le volume de notre échantillon est de $49.8 \pm 1.4 \text{ cm}^3$ (voir Saint George [2019a] et Saint George et al. [2019b] pour plus de détails). La valeur de densité que nous trouvons est en accord avec les valeurs publiées dans la littérature (Britt and Consolmagno [2003]) pour les chondrites ordinaires, principalement H et L (voir la Figure 2).

4.2 Susceptibilité magnétique

Une manière quantitative de déterminer la faculté d’aimantation d’une météorite est de mesurer sa susceptibilité magnétique. La valeur que nous avons obtenue pour chaque météorite est la moyenne de 3 séries de 20 mesures (donc 60 mesures au total) prises pour 3 orientations différentes et approximatives du détecteur (0° , 45° et 90°) pour tenir compte de la forte hétérogénéité de la météorite (voir Saint George [2019a] pour plus de détails). La valeur obtenue est $\log_{10}(\chi) = 4.81 \pm 0.07$ (avec χ exprimé en $10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$).

Quelques revues sur les densités et les susceptibilités magnétiques des différentes familles de météorites ont été publiées (voir Consolmagno et al. [2006], Macke et al. [2011a] et Macke et al. [2011b]). Il y a une forte disparité des valeurs de susceptibilité magnétique pour les différentes familles (voir par exemple Saint George [2019a]). Nos mesures semblent mieux correspondre à une chondrite de type L.

Une meilleure façon de caractériser MS1 est de représenter la densité en fonction de la susceptibilité magnétique (comme sur la Figure 3). D’après cette figure, MS1 serait dans le groupe des chondrites L.

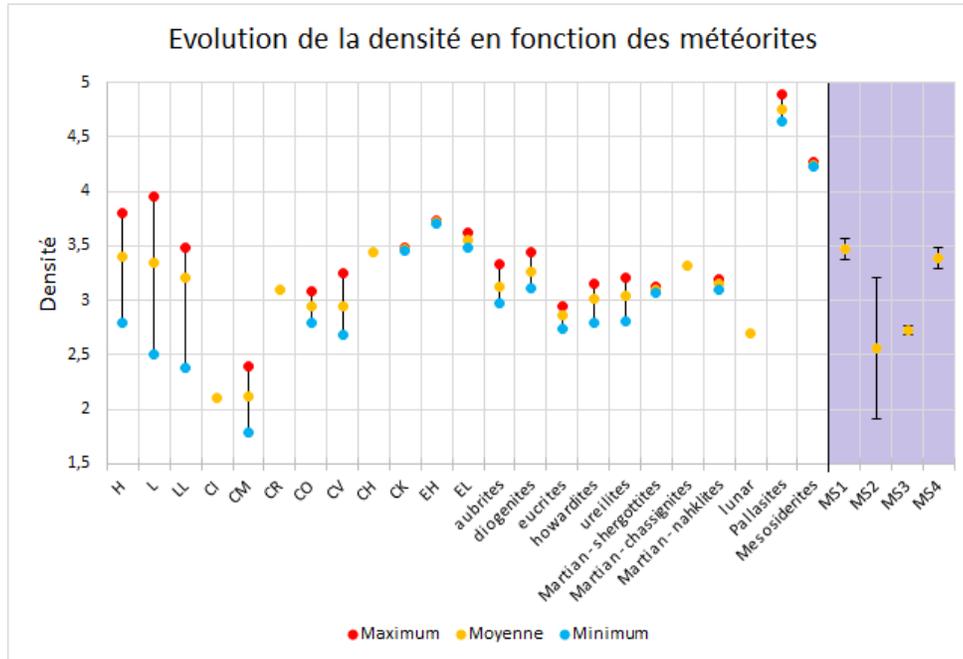


FIGURE 2 – Résultats de la mesure de la densité de MS1 (zone colorée) avec son incertitude à 1σ (dans la zone colorée). Comparaison avec les principales familles de météorites (valeurs tirées de Britt and Consolmagno [2003]) pour lesquelles la moyenne, le maximum et le minimum sont donnés.

4.3 Analyse XRF

La première technique d'analyse que nous avons utilisée est la technique XRF qui présente l'avantage d'être rapide à mettre en oeuvre. Cette technique d'analyse permet de détecter les éléments les plus abondants dans les échantillons mais ne permet pas de déterminer leurs abondances en l'absence de calibration. Une autre limitation importante est qu'il n'est pas possible de détecter les éléments plus léger que Mg (Na est détectable s'il est présent en grande quantité). Comme nous analysions des échantillons de compositions inconnues, il n'était pas possible de faire cette calibration. Autre point important, les analyses XRF ont été effectuées sur des zones d'environ 5 mm de côté. Cela permet d'avoir une information moyenne mais ne permet pas de faire des mesures sur des clastes et des chondres qui ont une taille millimétrique ou inférieure.

Les résultats XRF sont donnés en nombre de coups. Ce nombre n'est pas directement proportionnel à l'abondance de l'élément mais il donne tout de même une indication intéressante sur la composition. Les résultats sont présentés sur la Figure 4.

Nous avons comparé les résultats des analyses XRF de MS1 avec ceux d'une autre chondrite que nous avons analysée : une chondrite référencée (NWA 869) de type L4-6. Malheureusement, nous n'avons pas d'autres mesures XRF de météorites référencées et il n'est donc pas possible d'aller très loin dans la comparaison à partir de ces analyses. On remarque tout de même sur la Figure 4 que la distribution XRF de MS1 ressemble fortement à celle de NWA 869, notamment pour Fe et Ca.

4.4 Analyse EDS

La micro-analyse X par sonde électronique que nous avons utilisée donne les abondances relatives (en nombre d'atomes) des éléments dans une zone qui peut aller de quelques millimètres à quelques micromètres. Plusieurs zones d'intérêt ont été choisies sur des critères visuels. En effet, on distingue, sur les faces de la météorite, des inclusions métalliques et de nombreux chondres.

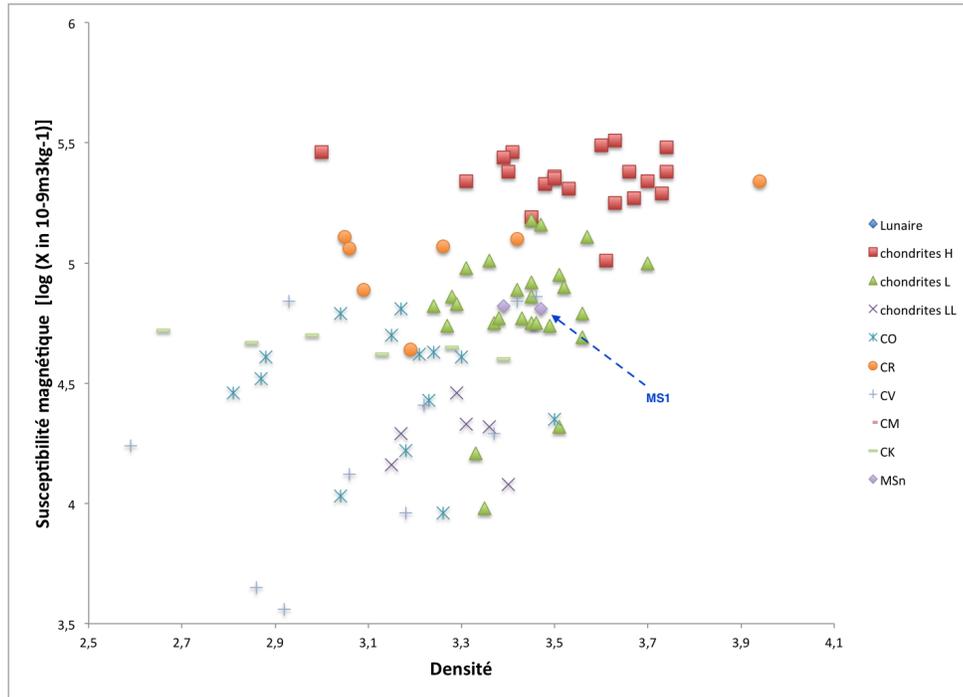


FIGURE 3 – Susceptibilité magnétique en fonction de la densité de plusieurs familles de météorites (données de Consolmagno et al. [2006], Macke et al. [2011a] et Macke et al. [2011b]). Comparaison avec les mesures que nous avons effectuées pour MS1.

Trois zones principales ont été analysées (voir la Figure 5) : une inclusion d’aspect métallique, une zone très sombre et un claste relativement clair qui semble présenter des signes d’altération (oxydation?). Les résultats des abondances relatives en masse sont données dans la Figure 6. Certaines valeurs remarquables (par rapport aux autres) sont colorées pour faciliter la lecture du texte.

4.4.1 Inclusion d’aspect métallique

Les abondances mesurées au point A dans la zone z1 sont riches en fer et nickel (tous les autres éléments sont relativement peu abondants). La partie claire est donc très probablement constituée d’un alliage Fe-Ni (ce qui est très fréquent dans les chondrites). On retrouve ce type de zone sur l’ensemble de la météorite comme on peut le voir aussi sur les zones z2 et z3. Près de cette inclusion Fe-Ni, on trouve une zone riche en fer et soufre (zone z1-C). Ces deux éléments ont une abondance identique (20% en atomes). Le minéral correspondant est probablement la troïlite (FeS) que l’on retrouve aussi fréquemment près de zones riches en Fe-Ni dans les chondrites.

Nous avons analysé la photographie EDS de la zone z3 avec le logiciel ImageJ. Grâce à l’étude des niveaux de gris, nous avons calculé la proportion des inclusions de Fe-Ni et FeS. Le total est de 7% (proportion de la surface recouverte par ces deux types d’inclusions). Ce résultat semble exclure les chondrites ordinaires de type H et LL.

4.4.2 La matrice

La matrice n’est pas facile à distinguer sur la photographie de base de cette météorite. Sur les images en microscopie électronique, elle semble correspondre visuellement aux zones z1-D et z2-A (voir Figure 5). Il se trouve que ces deux zones ont à peu près la même composition élémentaire avec une abondance relative assez importante de Mg qui pourrait signer la présence de forstérite

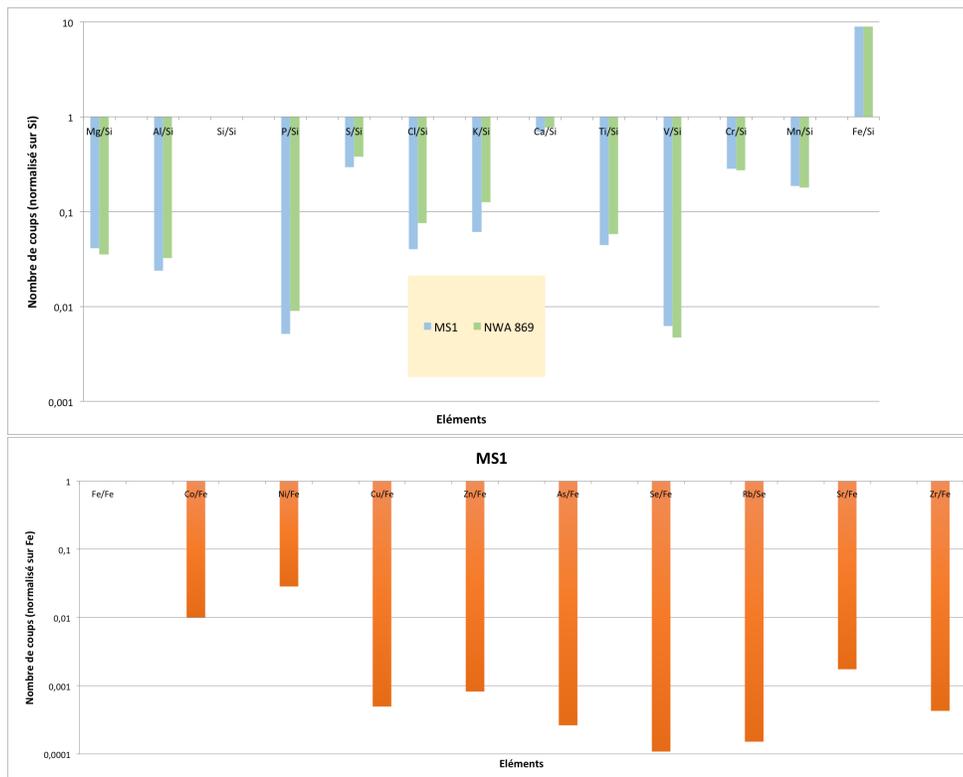


FIGURE 4 – Résultats XRF pour MS1 et une autre chondrite ordinaire (NWA 869, voir texte). Les valeurs correspondent au rapport du nombre de coups de chaque élément sur celui de Si (en haut) ou Fe (en bas). L'énergie d'activation pour le graphe du haut est de 10 keV et 30 keV pour le graphe du bas.

(Mg_2SiO_4) mais aussi d'enstatite ($MgSiO_3$). L'olivine (ici la forstérite) est effectivement le minéral dominant de la matrice des chondrites ordinaires. Compte-tenu de la faible proportion de Ni et S, le fer est très probablement oxydé (peut-être sous la forme de magnétite Fe_3O_4). On note que la matrice de la zone z2 contient de nombreuses fissures.

La zone z3 pourrait être dominée par la matrice du claste correspondant (si cette zone correspond bien à un claste). Les éléments dominants sont Fe, Si et Mg qui pourraient aussi correspondre notamment à la forstérite. On devine aussi des inclusions de Fe-Ni et FeS (à leurs aspects visuels).

4.4.3 Présence de carbone

Les trois zones z1, z2 et z3 présentent des inclusions noires assez nombreuses. L'analyse de l'une d'elles, la zone z1-E, montre qu'elle est très riche en carbone. On retrouve beaucoup de ces régions noires dans la zone z3 qui présente effectivement une grande proportion de carbone (20% atomique). On retrouve aussi une proportion importante de C dans les zones z2-B et z2-F qui sont par ailleurs riches en Fe et Si. Il ne nous semble pas facile d'interpréter ces résultats. Il n'est pas facile en particulier de déterminer si ce carbone est une contamination.

4.4.4 Zones oxydées

Les analyses des zones z1-B et z1-F montrent deux régions distinctes riches en Fe et O. Les autres éléments sont très peu abondants par comparaison. Il se pourrait donc que la région z1-B soit du fer oxydé (magnétite Fe_3O_4 et/ou hématite Fe_2O_3 par exemple). Il n'est pas facile de déterminer si la zone z1-F est une fissure et donc d'extrapoler sur la composition des autres

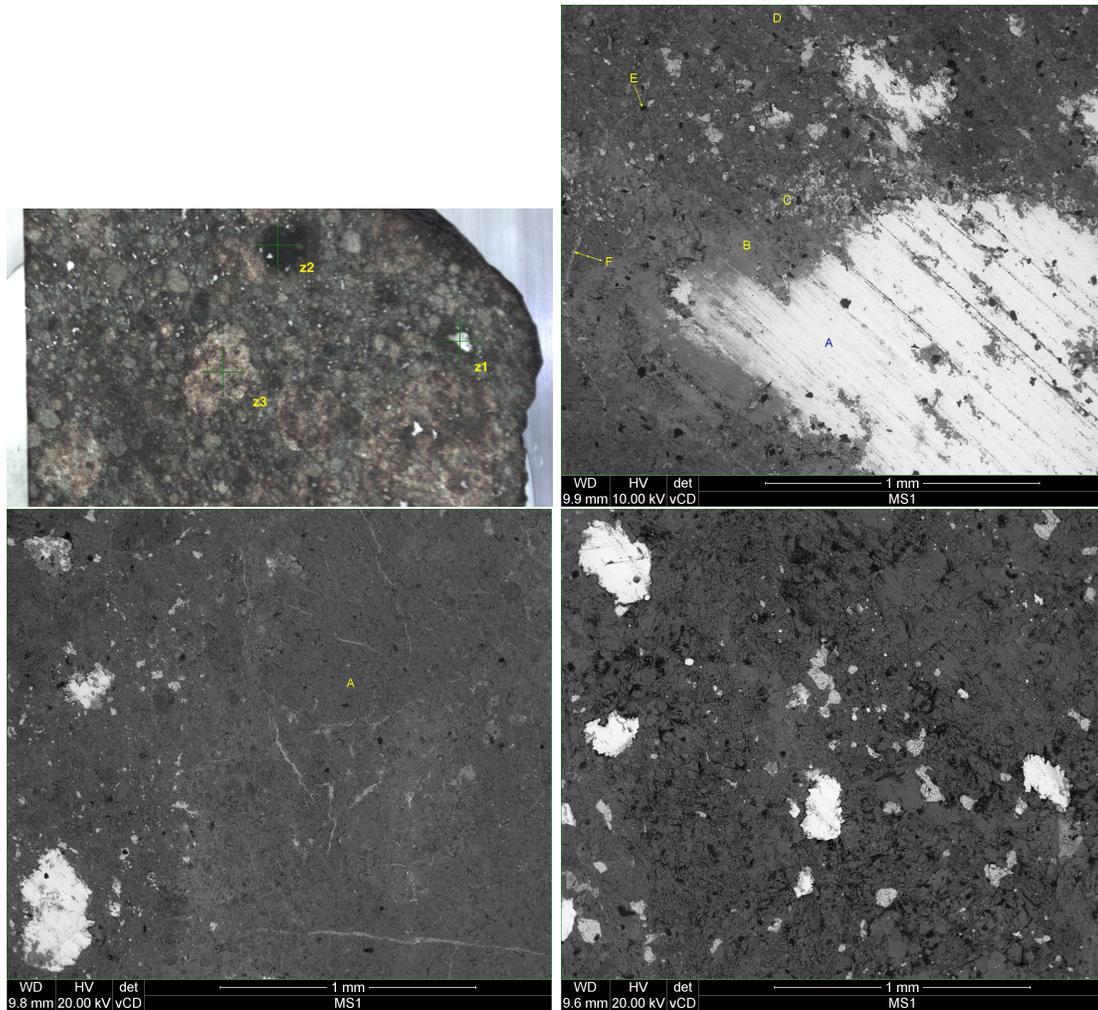


FIGURE 5 – En haut à gauche : face de la météorite analysée en EDS. Les trois zones qui ont été analysées sont indiquées par des croix vertes. Une photographie au microscope électronique est présentée pour ces trois zones. En haut à droite : zone z1. En bas à gauche : zone z2. En bas à droite : zone z3. La taille de chaque zone est de 2,3 mm × 2,3 mm environ. Dans la zone z1, six points de mesure dans des régions différentes ont été pris.

	z1-A (wt %)	z1-B (wt %)	z1-C (wt %)	z1-D (wt %)	z1-E (wt %)	z1-F (wt %)	z2-A (wt %)	z3 (wt %)
C	4,53	9,38	12,34	8,52	38,6	5,96	9,9	20,3
N	0	0	0,69	0,72	3,69	0	0	1,25
O	4,15	33,43	14,09	37,92	23,02	39,68	37,39	35,04
Na	0,18	0,74	0,54	0,47	2,67	0,3	0,92	0,99
Mg	0,83	1,65	2,02	19,95	3,4	3,28	14,8	9,75
Al	0	0,22	0,34	0,38	2,1	0,22	1,39	1,3
Si	0,65	1,86	1,99	13,57	10,45	3,15	16,74	13,54
P	0	0	0,11	0,03	0,1	0,04	0,11	0,02
Hg	0	0	0	0,22	0,1	0	0	0
S	0,15	1,08	23,37	0,26	0,7	0,59	1,35	0,78
Cl	0	1,08	0,15	0,15	1,99	0,24	0,27	0,36
Th	0	0	0	0,23	0	0	0	0
K	0,07	0,58	0,18	0,15	1,07	0,16	0,73	0,41
Ca	0	0,32	0,26	0,4	3,26	0,27	1,28	2,12
Ti	0	0	0	0,1	0,09	0	0,13	0,18
Cr	0	0,27	0	0,16	0,14	0	0,36	0,34
Mn	0	0	0	0,36	0,1	0	0,24	0,23
Fe	75,3	46,46	42,8	15,64	8,14	43,9	13,83	12,22
Co	0,83	0,58	0,22	0,11	0,08	0,54	0,05	0,14
Ni	13,32	2,37	0,9	0,28	0,32	1,65	0,51	1,03
Ta	0	0	0	0,38	0	0	0	0
Total	100,01	100,02	100	100	100,02	99,98	100	100

FIGURE 6 – Abondances relatives (en masse) des éléments identifiés par EDS pour chacune des zones représentées sur la Figure 5. Certaines valeurs remarquables pour chaque zone sont colorées (voir le texte). Les zones z1-A et z1-C sont des inclusions métalliques (Fe-Ni et FeS). La matrice correspond aux zones z1-D et z2-A. Une zone riche en carbone est la zone z1-E.

fissures de la zone z3 par exemple. Ces résultats montrent cependant que MS1 a été altérée et qu'une partie du fer est oxydé.

4.5 Analyse Raman

Quelques analyses Raman ont été effectuées sur la météorite MS1. Plusieurs points d'analyses ont été effectués dans la zone z2. Les spectres Raman montrent la présence d'enstatite (MgSiO_3), de forstérite (Mg_2SiO_4) et de magnétite (Fe_3O_4) comme le suggéraient les résultats de l'analyse EDS. Plusieurs points de mesure ont aussi été effectués dans la zone z3. Les minéraux identifiés sur les spectres sont : un membre du groupe des augites ($(\text{Mg,Fe,Ca})_2\text{Si}_2\text{O}_6$), de l'enstatite (MgSiO_3), de l'hématite (Fe_2O_3) et de l'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) (voir le spectre sur la Figure 7). Ces analyses expliquent la présence de certains éléments comme Ca, Na et Al détectés en EDS. Elles montrent aussi la complémentarité de ces deux analyses car il n'était pas possible de prévoir la présence de tous ces minéraux à partir des abondances relatives obtenues en EDS. Une cartographie Raman nous aurait permis de compléter la liste des minéraux présents dans ces zones.

5 Conclusion

Nous avons effectué plusieurs analyses sur la chondrite ordinaire que nous appelons MS1 et nous pensons d'après les résultats que c'est une chondrite de type L, compte-tenu notamment de la proportion d'inclusions métalliques. Nous avons remarqué que beaucoup de ces inclusions ne sont pas visibles sur une photographie classique car elles sont cachées par des zones assez fortement oxydées. Cette étude préliminaire nécessiterait des analyses complémentaires en EDS et en Raman. En particulier, nous n'avons pas analysé les différents chondres ni les clastes clairs bien visibles.

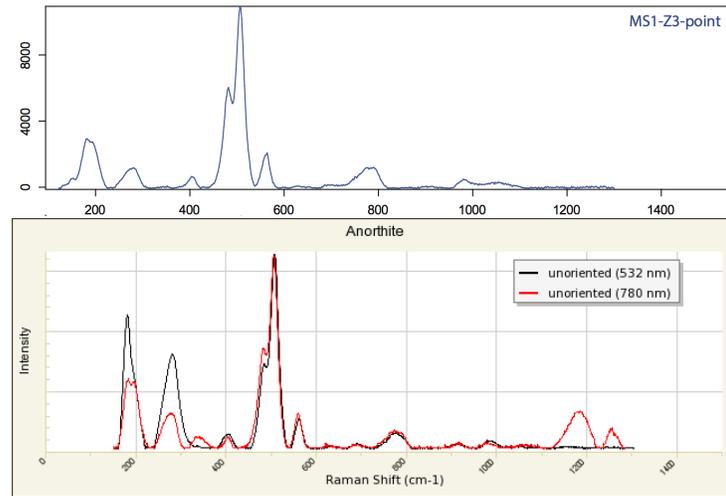


FIGURE 7 – Spectre Raman que nous avons obtenu (en haut) et comparaison avec un spectre de la base de données RRUFF pour l’anorthite (en bas). Notez que les limites en abscisses ne sont pas les mêmes sur les deux spectres.

Remerciements

Un grand merci à Mathieu Sudre, collectionneur de météorites, pour nous avoir prêté ses précieuses météorites pour toute la durée du stage. Nous sommes ouverts à toutes les critiques constructives et toutes les informations qui pourraient améliorer cette étude du point de vue de l’analyse des résultats et de leur interprétation.

Références

- D. T. Britt and G. J. Consolmagno. Stony meteorite porosities and densities : A review of the data through 2001. *Meteoritics and Planetary Science*, 38(8) :1161–1180, Aug 2003. doi : 10.1111/j.1945-5100.2003.tb00305.x.
- G. J. Consolmagno, R. J. Macke, P. Rochette, D. T. Britt, and J. Gattacceca. Density, magnetic susceptibility, and the characterization of ordinary chondrite falls and showers. *Meteoritics and Planetary Science*, 41(3) :331–342, Mar 2006. doi : 10.1111/j.1945-5100.2006.tb00466.x.
- B. Lafuente, R. T. Downs, H Yang, and N Stone. The power of databases : the RRUFF project. In *Highlights in Mineralogical Crystallography*, pages 1–30. T. Armbruster and R. M. Danisi, Berlin, w. de gruyter edition, 2015.
- R. J. Macke, D. T. Britt, W. S. Kiefer, A. J. Irving, and G. J. Consolmagno. Porosity, Magnetic Susceptibility and Density of Lunar Meteorites. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 74 :5093, Sep 2011a.
- Robert J. Macke, Guy J. Consolmagno, and Daniel T. Britt. Density, porosity, and magnetic susceptibility of carbonaceous chondrites. *Meteoritics and Planetary Science*, 46(12) :1842–1862, Dec 2011b. doi : 10.1111/j.1945-5100.2011.01298.x.
- L. Saint George. *Rapport de stage de M1 : analyse multi-techniques de météorites chondritiques et lunaires*. Université de Bordeaux, 2019a. doi : 10.13140/RG.2.2.12103.85925.

- L. Saint George, M. Dobrijevic, A. Le Postollec, and Londeix. *Mesure de la densité de plusieurs météorites*. Université de Bordeaux, 2019b. doi : 10.13140/RG.2.2.11523.04640.
- F. Tuinstra and J. L Koenig. Raman Spectrum of Graphite. *The Journal of Chemical Physics*, 53(3) :1126–1130, August 1970. ISSN 00219606. doi : 10.1063/1.1674108.